土压平衡盾构螺旋输送机渣土运移及参数影响

支斌[1],李树忱[1],朱颖[2],田垚[2],万泽恩[1]

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心,250061 济南;2. 齐鲁交通发展集团有限公司,250014 济南)

摘　要:为了更切实际的研究土压平衡盾构中螺旋输送机在稳定开挖面、排渣等方面的作用,在已有螺旋输送机渣土输送理论模型的基础上,考虑了螺旋输送机实际倾角及内部渣土体的重力,以及螺旋输送机中土体螺旋输送的实际工况,建立理论力学模型。通过土压平衡原理推导出螺旋输送机的土流量及土压梯度公式,并分析了它们与各参数之间的变化规律。除了考虑基本的机械参数和渣土性质参数外,还分析了不同性质土体对出渣效率的影响以及土流角对土流量和土压梯度的影响规律:土流量增长速率随着土流角增加呈先减小后增大的非线性趋势;土压梯度随着土流角增加呈三角函数式增长。为实际工程中合理设计、选型、评价土压平衡盾构螺旋输送机提供一定的理论基础和工程借鉴。

关键词:螺旋输送机;土流量;土压梯度;土流角;参数分析

中图分类号:U455.3+3　　**文献标志码:**A

Earth pressure balance shield screw conveyor slag transport and influence of parameters

ZHI Bin[1], LI Shuchen[1], ZHU Ying[2], TIAN Yao[2], WAN Zeen[1]

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, 250061 Jinan, China;
2. Qilu Transportation Development Group Co., Ltd. 250014 Jinan, China)

Abstract: In order to more realistically study the role of screw conveyor in stable excavation surface and slag discharge in the earth pressure balance shield, on the basis of the existing screw conveyor slag transport theoretical model, the actual inclination angle of the screw conveyor and the gravity of the soil, as well as the actual working conditions of the screw conveying soil in the screw conveyor, are considered, and the theoretical mechanical model is established. Based on the principle of earth pressure balance, the formulas of earth flow and earth pressure gradient of the screw conveyor are derived, and the variation rules between them and various parameters are analyzed. In addition to considering basic mechanical parameters and slag property parameters, the effect of different types of soil on slag efficiency and the effect of soil flow angle on soil flow and soil pressure gradient are also analyzed: the increase rate of soil flow increases with soil flow angle. The increase shows a non-linear trend that decreases first and then increases; the gradient of the earth pressure increases with the increase of the soil flow angle in a trigonometric function. It provides

收稿日期:2022-07-16　　**修回日期:**2022-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51879150)

通信作者:李树忱,教授。E-mail:shuchenli@sdu.edu.cn

引用格式:支斌,李树忱,朱颖,等. 土压平衡盾构螺旋输送机渣土运移及参数影响[J]. 应用力学学报,2023,40(1):107-115.
ZHI Bin, LI Shuchen, ZHU Ying, et al. Earth pressure balance shield screw conveyor slag transport and influence of parameters[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(1):107-115.

a certain theoretical basis and engineering reference for reasonable design, type selection, and evaluation of earth pressure balance shield screw conveyor in practical engineering.

Key words: screw conveyor; soil flow; soil pressure gradient; soil flow angle; parameter analysis

土压平衡盾构机主机主要由刀盘、盾体、螺旋输送机、皮带运输机等几部分构成[1],在各部分的协调作用下完成掌子面土体开挖、渣土运移、管片拼装等过程。其中螺旋输送机[2]位于开挖室下部,是土压平衡盾构排渣系统中的重要组成部分,如图1所示。在盾构施工中,螺旋输送机不仅有排除开挖面渣土的作用,还有控制其底部土压,维持土压平衡,保证施工正常进行的作用。了解土压平衡盾构螺旋输送机中的土压力分布和压力梯度对于调节土舱压力、维持掌子面土压平衡至关重要。

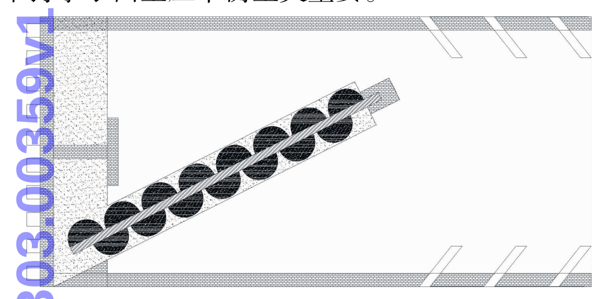


图1 螺旋输送机工作示意图

Fig. 1 Working diagram of screw conveyor

土压平衡盾构螺旋输送机运移渣土过程中的关键参数是土流量、土压和扭矩等[3]。这些参数的控制取决于土壤性质和螺旋输送机运行参数,如土体容重、螺旋输送机的倾角、长度、半径、转速等等。螺旋输送机运送渣土的能力好坏直接关系着掌子面土压平衡,通过对螺旋输送机理论模型的分析,对合理选择盾构螺旋输送机、控制关键参数及施工中渣土改良[4]等有着重要的意义。

本研究对螺旋输送机的理论分析采用了与BURBIDGE, YOSHIKAWA[5-6]类似的方法,对螺旋输送机内渣土进行分析,并结合MERRITT[7]对螺旋输送机理论模型的分析,推导出了螺旋输送机在运行过程中土流量以及内部土体的土压梯度公式,并进行了参数的敏感性分析,得到其影响规律,为以后土压平衡盾构隧道工程中螺旋输送机的合理选择提供理论指导。

1 基本假设

螺旋输送机的几何形状、尺寸参数等决定了渣土运移的土流量以及土压梯度,而且土体的力学状态是研究土压平衡盾构平衡开挖面土压力[8]的重要因素。因此建立一个合理的数学模型,可以更好的研究螺旋输送机内输送渣土的能力以及内部土压梯度情况。

关于螺旋输送机的理论模型有很多种,比如江玉生等[9]将整个螺旋输送机内部看成是均匀的流塑态土,考虑螺旋输送机的实际倾角及土体的重力,利用土压平衡原理,建立了力学模型,推导出了螺旋输送机内部压力梯度的力学表达式[10];国外也有学者考虑螺旋输送机的实际构造,研究在内部的螺旋通道、旋转轴等结构下土体的力学行为,但是没有考虑土体本身的重力以及螺旋输送机的实际倾角。

而本研究中提出的螺旋输送机计算模型如图2,在既有经验的基础上,既考虑了螺旋输送机的实际构造,假设土体在内部螺旋输送,并在盾构机中有一定的倾角;又考虑了土体本身的重力成分,以此模型来研究螺旋输送机的土流量及内部土压梯度。

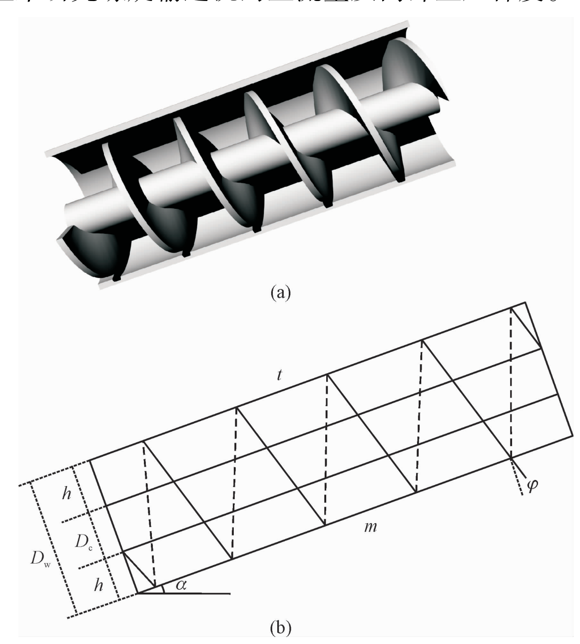


图2 螺旋输送机理论计算模型

Fig. 2 Theoretical calculation model of screw conveyor

图中具体的符号如下:α 为螺旋输送机的倾斜角;D_w为螺旋输送机外筒直径;D_c为旋转轴的直径;h 为外筒与轴之间的距离;φ 为螺旋角;m 为螺旋输送机的长度;t 为螺旋间距;

为了有效地分析螺旋输送机在运行过程中土体

的流动速度、土体的土压,以及适当的简化计算过程,这里做出如下假设。

1)螺旋输送机内渣土呈流塑性,均匀连续的充满在螺旋通道上。

2)由于实际上螺旋通道的厚度非常小,相比于螺旋间距在计算中可以忽略不计。因此计算中不考虑螺旋通道的厚度。

3)假设内部土体与螺旋输送机的外壁、内轴、螺旋通道相互作用的剪切应力相同,数值上取土体的不排水抗剪强度[11]。

2 理论模型建立

理论模型的建立是从考虑螺旋输送机槽内土体单元的运动开始的[12]。假设螺旋通道已完全填满,土与外筒壁、旋转轴和两个螺旋通道接触,忽略了旋转轴与外筒壁之间的径向间隙。将土块看成均匀各向同性材料,最大剪应力等于不排水抗剪强度。假定渣土块与外筒壁、旋转轴和螺旋通道的相对运动产生作用于土块表面的剪应力均匀分布在土体与螺旋槽界面处形成的剪切面上。当螺旋杆旋转时,作用在螺旋槽内土块上的力导致了土体在螺旋通道上的流动。

2.1 土流量

在 CHUNG、BURBIDGE、BRIDGWATER 关于研究螺旋输送机理论输送的基础上,MERRITT[7] 经研究提出一种土块沿螺旋带运动方向的关系。当螺杆旋转时,土块沿螺旋通道流动,相对于筒壁和螺旋杆移动。图 3 说明了螺旋输送机中土块的运动情况。在模型中选取 2 套坐标系用于本研究计算,分别为以螺旋杆方向为 x 轴,垂直于螺旋杆方向为 y 轴;及以螺旋通道运行方向为 l 轴,垂直于 l 轴的为 w 轴。当螺杆旋转时,选取螺旋槽顶部的 A 点作为研究对象,它相对于外筒壁沿垂直于螺杆轴的方向做切向运动,速度矢量用 v_y 表示。这里将此速度进行分解,分解的第一部分为土块的运动方向与螺旋通道方向平行,速度矢量用 v_1 表示;由于土块在螺旋道上相对滑动,土块相对于外筒壁的位移与螺旋杆的切向运动方向成一定角度 θ,因此分解的第二部分为与 v_y 成 θ 角度的速度矢量 v_2。土块在与螺杆轴平行的方向上也有一个速度分量 v_x,这样方便计算螺旋输送机的土流量[13]。

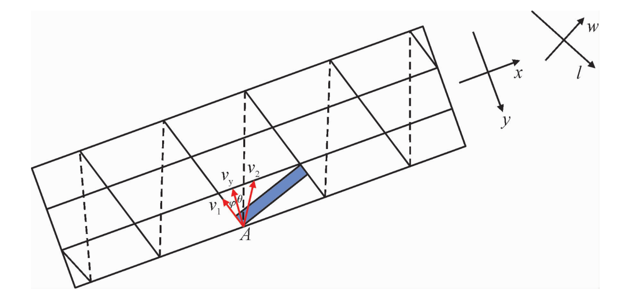


图 3 螺旋输送机内土体运动情况

Fig. 3 Soil movement in screw conveyor

根据以上速度矢量之间的关系,速度矢量三角形如图 4 所示。

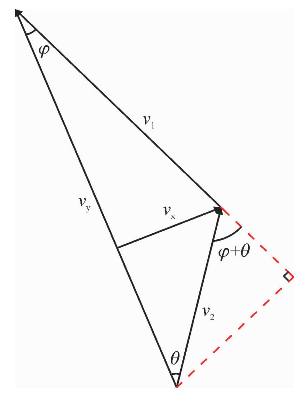


图 4 速度矢量三角形

Fig. 4 Speed vector triangle

根据角度关系可以求得螺旋输送机内渣土整体沿 x 轴方向的运行速度 v_x,即

$$v_2 = v_y \frac{\sin\varphi}{\sin(\varphi + \theta)} \tag{1}$$

$$v_x = v_2 \sin\theta \tag{2}$$

$$v_x = v_y \frac{\sin\theta \times \sin\varphi}{\sin(\varphi + \theta)} \tag{3}$$

式中 v_y 代表相对于外筒壁沿垂直于螺杆轴的方向做切向运动,其可以由螺旋杆的转速表示,即

$$v_y = \pi \cdot D_w N \tag{4}$$

式中:N 为螺旋杆的转速,其他字母含义在前文均已解释。因此

$$v_x = \frac{\pi \cdot D_w N \sin\theta \sin\varphi}{\sin(\theta + \varphi)} \tag{5}$$

则渣土的理论流量 Q_l 可以得到

$$Q_l = v_x \cdot S = \frac{\pi}{4}(D_w^2 - D_c^2)\frac{\pi \cdot D_w N \sin\theta \sin\varphi}{\sin(\theta + \varphi)} \tag{6}$$

在盾构工程中,螺旋输送机实际出土量要小于理论出土量,即存在出渣效率问题。李兴春[14] 针对改性砂性土盾构螺旋输送机力学特性提出螺旋输送机出渣效率 η 为实际渣土体积输送率与最大体积输送率的比值。

出渣效率 η 的引入对于理论出土量的计算无任何影响，在理论出土量的基础上优化得到实际情况的螺旋输送机出土量，且与理论出土量计算中的基本假设“螺旋输送机内渣土呈流塑性，均匀连续的充满于螺旋通道上”不冲突。出土效率 η 的大小与土体种类相关，不同土体的螺旋输送机出土效率是不同的，而且同一种土体经过改良也会使得出渣效率不同，见表1。

表1　不同土体螺旋输送机出土效率[15]

Tab. 1　Excavation efficiency of screw conveyor for different soil[15]

土体种类	出土效率/%
黏土	0.20～0.40
粉土	0.30～0.40
砂土	0.25～0.30
砂砾	0.25～0.30

因此，实际螺旋输送机的排渣土流量 Q 为

$$Q=\eta\cdot Q_l \tag{7}$$

将理论最大土流量式(6)代入实际土流量式(7)可得

$$Q=\eta\cdot\frac{\pi}{4}(D_w^2-D_c^2)\frac{\pi\cdot D_w N\sin\theta\sin\varphi}{\sin(\theta+\varphi)} \tag{8}$$

2.2　土压梯度

当螺杆旋转时，作用在土块上的力使土体沿着螺旋通道流动出土，为了计算螺旋输送机内的土压情况，本节选取一个微单元作为研究对象，求出沿着螺旋通道方向(即上文提到的 l 轴方向)的受力情况，为了分析简化，将作用于土体的受力状态理想化，假设沿螺旋通道的压力差等于测得的垂直面上总正应力的变化量，进而确定土压[16]。

因此，对微单元进行受力分析后，图5体现了作用于螺旋槽中土块单元的受力情况。其中，F_{sn}、F_{st} 分别为土块单元上表面所受轴向力与剪切力；F_{xn}、F_{xt} 分别为土块单元下表面所受轴向力与剪切力；F_{qn}、F_{qt} 分别为土块单元前表面所受轴向力与剪切力；F_{hn}、F_{ht} 分别为土块单元后表面所受轴向力与剪切力；F_{zn} 为土块单元左表面所受轴向力；F_{yn} 为土块单元右表面所受轴向力。

在匀速转动的螺旋输送机运行过程中，土体沿着螺旋通道稳定输送，则作用于土块微单元上的力在任何方向都处于平衡状态。而且认为土体与螺旋机外筒壁的摩擦剪应力的方向与土体和外筒壁之间的相对位移的方向一致，这里将它与第3节中土块相对于外壁筒的速度 v_2 联系在一起，认为它的方向与 y 轴有一个夹角 θ。因此，取平行螺旋方向作用于土块微单元上的力的平衡，建立关系式。

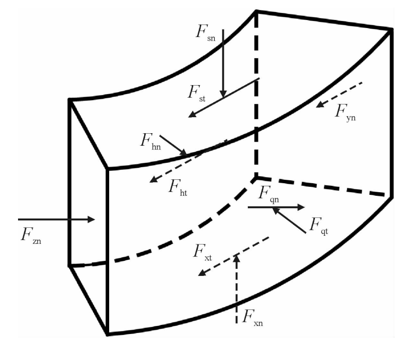


图5　土块单元受力分析

Fig. 5　Force analysis of soil element

$$\sum F_l=F_{qt}\cos(\theta+\varphi)-F_{ht}-F_{st}-F_{xt}-F_{yn}+F_{zn}=0 \tag{9}$$

此处假定作用于土体表面的剪应力是均匀分布的，并且由于土体本身的重力作用，土体与螺旋槽下方的剪应力应该比上方的剪应力要大，将 F_{xt} 分成两部分：重力在 w 方向的分力造成的摩擦力和与 F_{st} 大小相等的剪切力；而且 $F_{yn}=F_{zn}+\Delta F+G_l$，那么，式(9)化为

$$(\tau_q\omega dL)\cos(\theta+\varphi)-\tau_h\omega dL-\tau_s h dL-(\tau_x h dL+\mu G_w)-\omega h dP-G_l=0 \tag{10}$$

式中：τ_q 为土块微单元前面的力；τ_h 为土块微单元后面的剪应力；τ_s 为土块微单元上面的剪应力；τ_x 为土块微单元下面的剪应力，此处数值上 $\tau_s=\tau_x$；μ 为土块与螺旋通道的摩擦因数；ω 为螺旋通道之间的垂直距离，由模型图可以得到 $\omega=t\cdot\cos\varphi$；h 为旋转轴与螺旋输送机外壳之间的距离，也是微单元的厚度；dL 为所取微单元的长度；G_l、G_w 分别为土块微单元的重力在 l、w 方向上的分量。

其中，由模型可以得到

$$G_l=G\cdot\cos(\alpha+\varphi) \tag{11}$$

$$G_w=G\cdot\sin(\alpha+\varphi) \tag{12}$$

关于土体的自重 G，前文假设土质均匀，现假设土体的重度为，则，

$$G=\gamma dV=\gamma\omega h dL \tag{13}$$

由于 l 轴和 x 轴本身的夹角为螺旋角 φ，故有以下关系

$$dL=\frac{dx}{\sin\varphi} \tag{14}$$

式(10)可继续化为

$$\left(\tau_q t\cos\varphi \frac{dx}{\sin\varphi}\right)\cos(\theta+\varphi) - \tau_h t\cos\varphi \frac{dx}{\sin\varphi} - 2\tau_s h \frac{dx}{\sin\varphi} - \mu\gamma h t\cos\varphi \frac{dx}{\sin\varphi}\sin(\alpha+\varphi) - ht\cos\varphi dP - \gamma h t\cos\varphi \frac{dx}{\sin\varphi}\cos(\alpha+\varphi) = 0 \quad (15)$$

为了简化方程，根据基本假设，认为在不考虑土体的重力情况下，螺旋输送机内部土体与螺旋输送机的外壁、内轴、螺旋通道相互作用的剪切应力相同，而且一般近似于土体的不排水抗剪强度 S_u，即

$$\tau_q = \tau_h = \tau_s = \tau_x = S_u \quad (16)$$

式(15)可以进一步简化，即

$$dP = \frac{k_1 S_u}{h}dx - \frac{k_2 S_u}{h}dx - \frac{2k_3 S_u}{t}dx - (\mu k_4 + k_5)\gamma dx \quad (17)$$

式中：$k_1 = \frac{\cos(\theta+\varphi)}{\sin\varphi}$；$k_2 = \frac{1}{\sin\varphi}$；$k_3 = \frac{1}{\sin\varphi\cos\varphi}$；$k_4 = \frac{\sin(\alpha+\varphi)}{\sin\varphi}$；$k_5 = \frac{\cos(\alpha+\varphi)}{\sin\varphi}$；$S_u$ 为土块的不排水抗剪强度。

方程的 4 项分别表示螺旋机外筒表面剪应力、旋转轴表面剪应力、螺旋通道上下表面剪应力及在倾斜的螺旋输送机上土体本身的重力引起的静压差。

将公式中的左右两端分别对沿 x 轴的土压力变量 dP，和长度变量 dx 积分，从而给出土块微单元压力与螺旋输送机长度的关系式（这里假设 x_1 处土压为 P_1，x_2 处土压为 P_2），即

$$\int_{P_1}^{P_2} dP = \int_{x_1}^{x_2}\frac{k_1 S_u}{h}dx - \int_{x_1}^{x_2}\frac{k_2 S_u}{h}dx - \int_{x_1}^{x_2}\frac{2k_3 S_u}{t}dx - \int_{x_1}^{x_2}(\mu k_4 + k_5)\gamma dx \quad (18)$$

式中：x_1，x_2 分别为沿着螺旋输送机 x 轴方向任意 2 个不同的位置；P_1，P_2 分别为 x_1，x_2 处的土压。

积分化简可以得到

$$\Delta P = \left[\left(\frac{k_1 - k_2}{h} - \frac{2k_3}{t}\right)S_u - (\mu k_4 + k_5)\gamma\right] \cdot (x_2 - x_1) \quad (19)$$

该理论模型得到了一个恒定的压力梯度。从得出的公式可以看出一些变量和螺旋输送机自身运行条件对其内部土压梯度的影响。土流角对压力梯度有影响，因为土体与螺旋输送机外壳之间的剪应力发生变化，导致平行于螺旋槽的剪应力分量发生了变化，从而使螺旋输送机内土块压力产生一定的变化；螺旋槽与土体之间的剪应力也会使土压耗散的更大；螺旋输送机的几何形状、尺寸也会影响土压梯度，螺距越大，土压梯度越小。

根据上式可以计算螺旋机内任意地方的土压情况。在土压盾构工程中，需要重点注意的一般是开挖面土压、土舱土压分布、螺旋输送机底部土压、螺旋输送机排渣口的土压这几个点的压力值。螺旋输送机底部与土舱的最下方相连，一定程度上反应土舱下方的土压，而在螺旋输送机排渣口土压一般不能超过 3 bar，否则容易发生排渣闸门喷泥的现象。此公式为合理设计、选型、评价土压平衡盾构螺旋输送机及掌子面的稳定提供了一定的理论基础。

3 参数分析

由式(8)和式(19)可知，螺旋输送机渣土的流量和内部的压力梯度的影响因素有很多，这些因素大体上可以分为两大类：螺旋输送机机械参数和螺旋输送机所排渣土的性质参数[17]。下面将对本研究所得到的土流量及土压梯度公式进行参数化分析，探讨参数对其的影响规律。

3.1 土流量影响

由式(8)可知，螺旋输送机渣土流量的影响因素主要为螺旋输送机的外筒直径 D_w、旋转轴的直径 D_c、螺旋输送机转速 N、螺旋角 φ、土流角 θ、出渣效率 η 这六个影响因素。将 D_w 和 D_c 称为径向尺寸因素，主要考虑两者之差 h 的影响程度；根据式(8)可以明显看出螺旋角 φ 和土流角 θ 对土流量的影响程度在数值上的表现是相同的。

取一典型的盾构机掘进参数进行参数分析，计算螺旋输送机中的土流量，并分析各种影响因素对渣土流量的影响规律，其计算参数如表 2 所示，进行任一参数分析时，其他参数均视为常数，赋予下表中的数值。

表 2 土流量计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of soil flow

D_w/m	N/(r·min^{-1})	φ/(°)	θ/(°)	η
1.2	7	21	50	0.40

1）径向尺寸：将螺旋输送机旋转轴的直径视为常数，从而考虑螺旋输送机外直径对其内部渣土流量的影响。图 6 是土流量 Q 与螺旋输送机外径 D_w 的关系曲线。

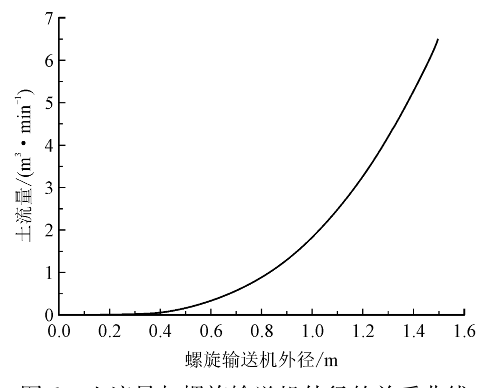


图 6　土流量与螺旋输送机外径的关系曲线

Fig. 6　Relationship between soil flow and outer diameter of screw conveyor

由图可知,螺旋输送机排渣的土流量 Q 随着螺旋输送机直径的增大呈现出非线性增长的趋势,结合公式可知整体呈现三次方速率增长。由此可知 D_w 值的大小控制着螺旋输送机的土流量,是影响盾构机排渣出土效率的重要因素之一,因此,在盾构机选型时要充分考虑土流量的要求,进而合理地设计螺旋输送机直径 D_w 的大小。

2)转速 N:将其他变量因素定为常数,考虑螺旋输送机转速对其内部渣土流量的影响,图 7 是土流量 Q 与螺旋输送机转速 N 的关系曲线。

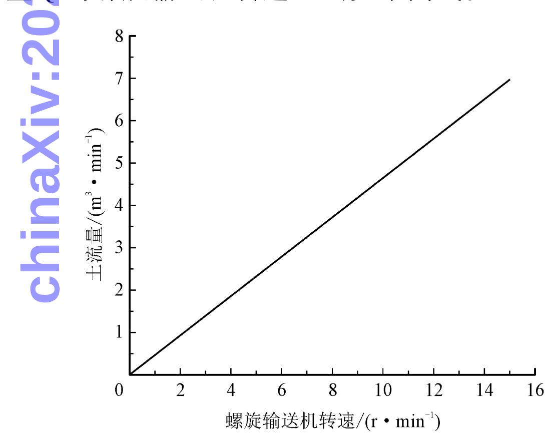


图 7　土流量与螺旋输送机转速的关系曲线

Fig. 7　Relationship between soil flow rate and screw conveyor rotating speed

由图 7 可知,螺旋输送机排渣的土流量 Q 随着螺旋输送机转速的增大呈线性增长。因此,转速 N 值的大小也是影响盾构机排渣效率的重要因素。而且在实际工程中螺旋输送机的转速需要合理的控制。N 较小时,排渣效率较低从而影响盾构机的正常掘进;N 较大时,会产生一定的离心力将渣土堆在靠近螺旋输送机外筒的一侧,这样就会形成筒壁黏结的问题,同样会降低螺旋输送机的排渣效率,进而影响盾构机的正常掘进。

3)螺旋角 φ 和土流角 θ:将其他变量因素定为常数,考虑螺旋输送机螺旋角 φ 和内部渣土的土流角 θ 对其内部渣土流量的影响,根据式(8)从数学的角度可知,这两个因素对土流量的影响在数值上是相同的。图 8 是土流量 Q 与螺旋角 φ、土流角 θ 的关系曲线。

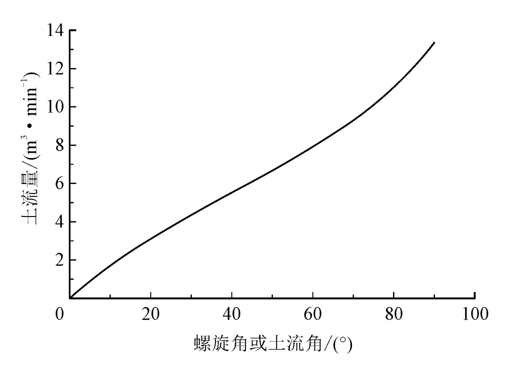


图 8　土流量与螺旋角、土流角的关系曲线

Fig. 8　Relationship between soil flow angle, helix angle and soil flow

由图 8 可知,螺旋输送机排渣的土流量 Q 随着螺旋角 φ 和土流角 θ 呈现出非线性增长,而且增长速率先减小后增大。

4)出渣效率 η:将其他变量因素定为常数,考虑螺旋输送机出渣效率对其内部渣土流量的影响,图 9 是土流量 Q 与螺出渣效率 η 的关系曲线。

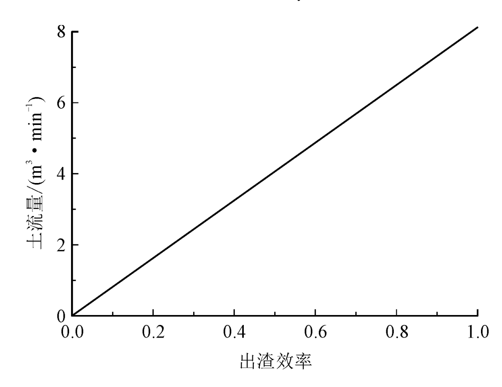


图 9　土流量与出渣效率的关系曲线

Fig. 9　Relationship between soil flow rate and slag efficiency

由图 9 可知,土流量随 η 的增大线性增加,且 η 值的大小与土体种类及土体性质相关,在盾构隧道穿越不同地层时,当切削渣土通过改良后达到理想流塑性状态,此时对应的 η 值最大,出渣效率最高,排渣效果最好。

3.2　土压梯度影响

由式(19)可知,螺旋输送机内压力梯度的影响

因素主要为螺旋输送机的径向尺寸 h、螺旋角 φ、土流角 θ、螺旋输送机倾角 α、螺旋间距 t、螺旋输送机长度 m、土体摩擦因数 μ、土体不排水抗剪强度 S_u、土体容重 γ 这些影响因素。其中螺旋输送机机械参数为 h、t、m、φ、α；螺旋输送机所排渣土的性质参数主要包括 θ、S_u、μ、γ。考虑实际情况，螺旋输送机排渣口的土压影响着隧道开挖过程中的排渣，而且对整个掌子面的开挖稳定也有一定的影响。因此重点研究螺旋输送机底部和排渣口之间的压力差 ΔP_{max}，即螺旋输送机内部的最大压力差。下面将从各个方面分析以上变量对螺旋输送机内最大压力差的影响。

同理取一典型的盾构机掘进参数进行参数分析，计算螺旋输送机中的土压梯度，并分析各种影响因素对土压梯度的影响规律，其计算参数如表 3 所示，进行任一参数分析时，其他参数均视为常数，赋予下表中的数值。

表 3 土压梯度计算参数

Tab. 3 Calculation parameters of earth pressure gradient

h/m	t/m	φ/(°)	m/m	α/(°)	θ/(°)	S_u/(kN·m^{-3})	μ	γ/(kN·m^{-3})
0.4	0.5	21	9	35	50	10	0.5	20

1）螺旋输送机机械参数：将其他变量因素定为常数，单一考虑螺旋输送机 h、t、m、φ、α 对螺旋输送机内最大压力差的影响，图 10 是螺旋输送机内最大压力差与它机械参数 h、t、m、φ、α 的关系曲线。

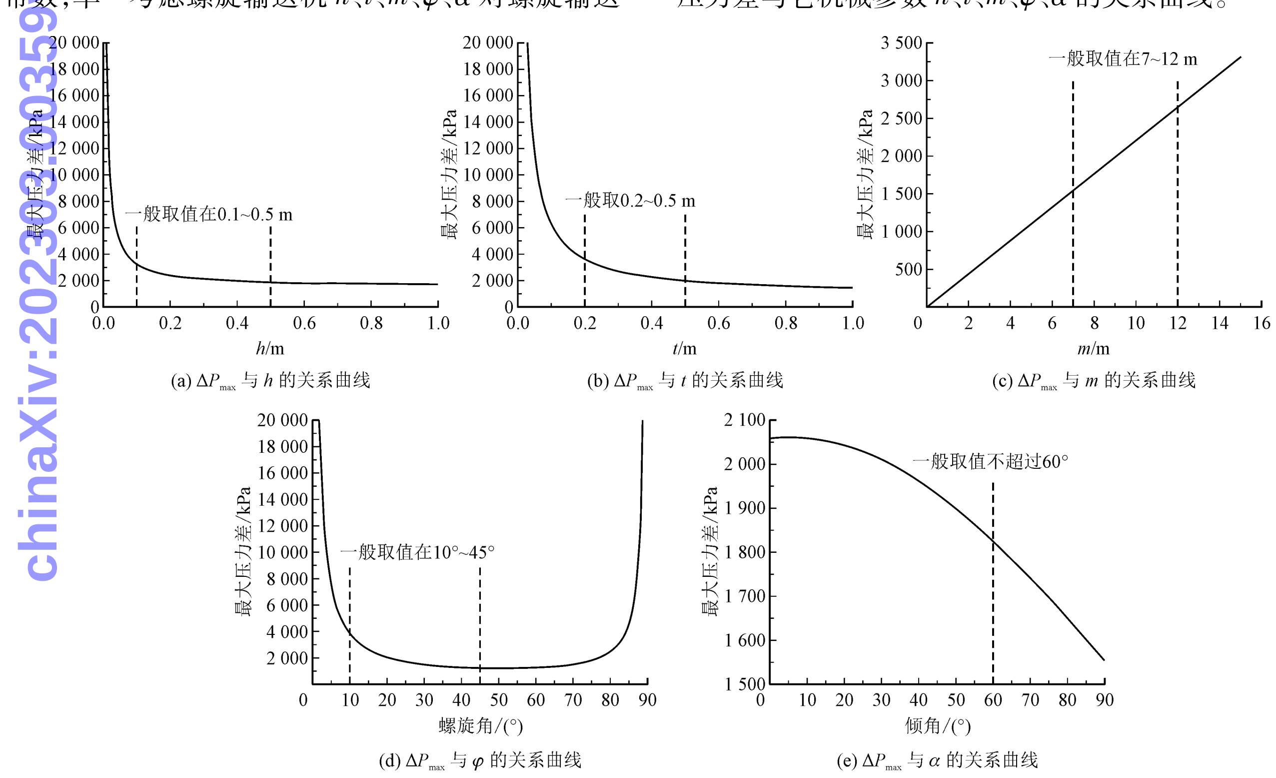


图 10 ΔP_{max}与螺旋输送机机械参数 h、t、m、φ、α 的关系曲线

Fig. 10 Relationship between ΔP_{max} and mechanical parameters of screw conveyor h, t, m, φ, α

由图可知，螺旋输送机内最大压力差 ΔP_{max} 与各机械参数之间的关系既有线性关系也有非线性关系。土压盾构工程中 h 的变化范围一般在 0.1～0.5 m、t 在 0.2～0.5 m、m 在 7～12 m、φ 在 15°～60°、倾斜角 α 一般不超过 60°。ΔP_{max} 随着 h、t、m、φ、α 的增大而减小，其具体的变化趋势是不完全相同的，ΔP_{max} 随着 h、t、φ 影响降低的速率逐渐减小，呈“上凹形”；ΔP_{max} 随着 α 的影响降低的速率逐渐增大呈“上凸形”。ΔP_{max} 随着 m 的增大呈线性增长。在盾构施工过程中，m 的长短受盾构机整体长度的制约，α 值的变化也不会太大，由隧道内部尺寸和盾构机内部空间布局所制约。

2）渣土性质参数：将其他变量因素定为常数，考虑渣土 θ、S_u、μ、γ 对螺旋输送机内最大压力差的影

响,图 11 是 ΔP_{max} 与渣土性质参数 θ、S_u、μ、γ 的关系曲线。

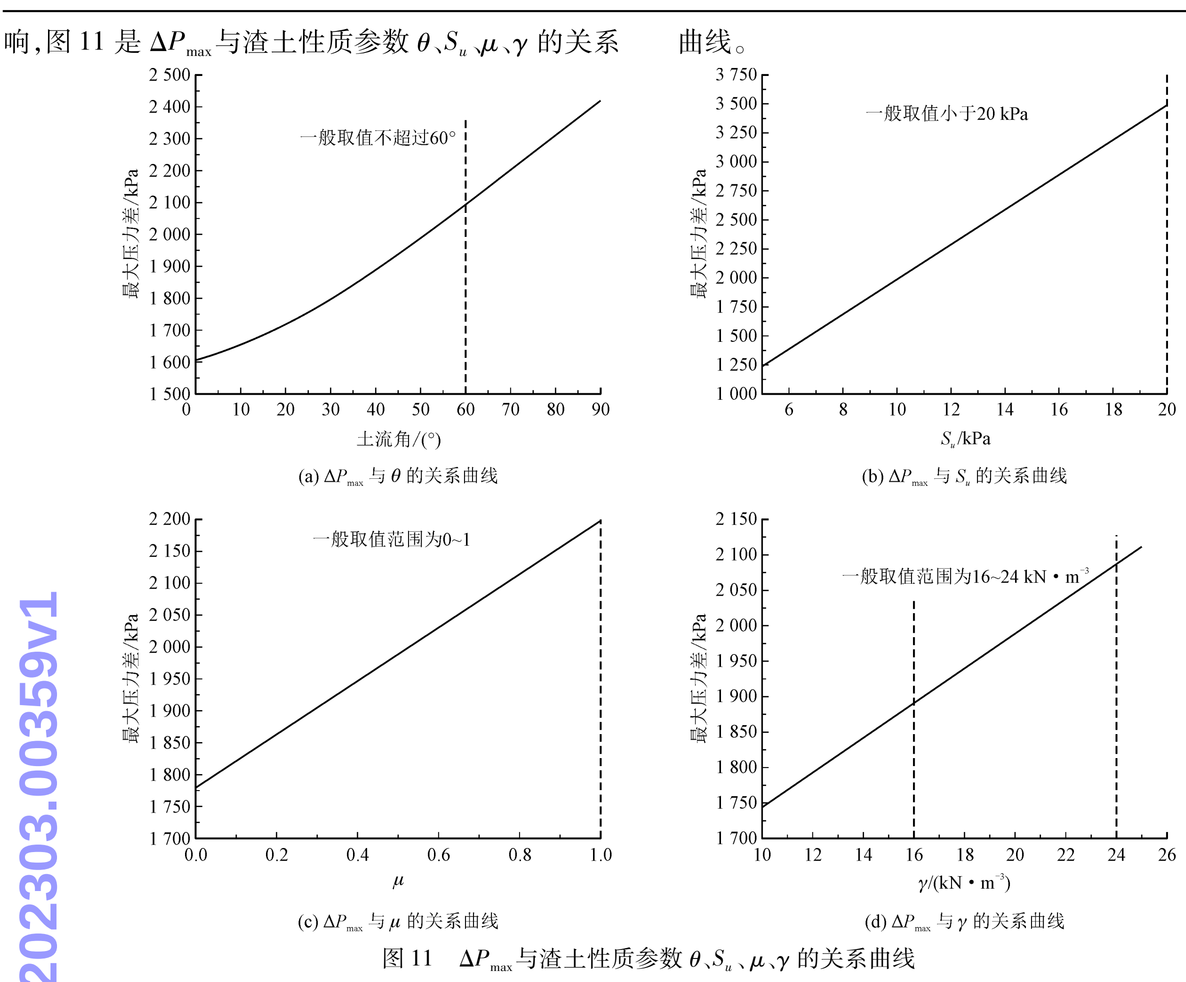


图 11 ΔP_{max} 与渣土性质参数 θ、S_u、μ、γ 的关系曲线

Fig. 11 Relationship between ΔP_{max} and soil property parameters θ, S_u, μ, γ

由图可知,螺旋输送机内最大压力差 ΔP_{max} 受渣土性质参数 θ、S_u、μ、γ 的影响相对一致。ΔP_{max} 随着 θ、S_u、μ、γ 的增大均呈现出增大的趋势。ΔP_{max} 随着 θ 的变化呈三角函数增长;ΔP_{max} 与 θ、S_u、μ、γ 均成线性关系,而这些值均与土体本身的性质以及渣土改良剂的使用有关,在土压平衡盾构中渣土改良是必不可少的环节,通过使用渣土改良剂来改变土体的渗透性、流动性等,最终改变了 θ、S_u、μ、γ 值的大小。因此,本研究推出的土压梯度公式为渣土改良奠定理论基础提供了一定的可能性。

4 结 论

从理论角度出发,建立了螺旋输送机物理模型,并考虑螺旋输送机实际构造以及重力因素,推导了螺旋输送机土压梯度公式和排渣土流量公式,并对公式进行参数敏感性分析,得到的具体结论如下。

1)螺旋输送机排渣土流量 Q 随着 D_w、N、φ、θ 的增大均呈现出增大的趋势,具体为 Q 随着 D_w 的变化呈三次方速率增长;Q 与 N 成线性关系;Q 随着螺旋角 φ 和土流角 θ 变化呈非线性增长,增长速率先减小后增大。

2)螺旋输送机内 ΔP_{max} 随着 h、t、φ、α 的增大而减小。ΔP_{max} 随着 h、t、φ 的影响降低的速率逐渐减小,呈“上凹形”;ΔP_{max} 随着 α 的影响降低的速率逐渐增大呈“上凸形”。ΔP_{max} 随着 m 的增大呈线性增长。最大压力差 ΔP_{max} 随着 S_u、μ、γ 的增大均呈现线性增大趋势,而随着 θ 的变化呈三角函数增长。最大压力差 ΔP_{max} 受渣土性质参数 θ、S_u、μ、γ 的影响相对一致。

3)通过参数敏感性分析,表明螺旋输送机机械参数和渣土性质参数均为土压平衡盾构渣土运移的重要影响因素。因此,既要合理地设计螺旋输送机机械尺寸,也要利用渣土改良等技术来调节渣土性质,进而保证盾构顺利排渣及隧道施工的高效性、安全性。

参考文献:

[1] 吕善. 盾构选型及综合施工技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道

大学,2017.

[2] 孟庆琳,屈福政,李守巨. 土体旋转流变仪开发与土压平衡盾构改性土体塑性流动特性实验[J]. 岩土工程学报,2011,33(10):1642-1648.

MENG Qinglin,QU Fuzheng,LI Shouju. Development of soil rotational rheometer and experiment on plastic flow characteristics of conditioned soil in earth pressure balance shield[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2011,33(10):1642-1648(in Chinese).

[3] 刘博,李守巨. 土压平衡盾构机密封舱土压力控制研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(增刊1):262-266.

LIU Bo,LI Shouju. Earth pressure control of headchamber in earth-pressure-balanced shield tunneling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2011,43(S1):262-266(in Chinese).

[4] 王树英,胡钦鑫,王海波,等. 盾构泡沫改良砂性渣土渗透性及其受流塑性和水压力影响特征研究[J]. 中国公路学报,2020,33(2):94-102.

WANG Shuying,HU Qinxin,WANG Haibo,et al. Study on permeability characteristics of the shield foam conditioned sand under influences of flow plasticity and water pressure[J]. China journal of highway and transport,2020,33(2):94-102(in Chinese).

[5] BURBIDGE A S,BRIDGWATER J. The single screw extrusion of pastes [J]. Chemical engineering science, 1995, 50 (16): 2531-2543.

[6] YOSHIKAWA T. Soil pressure drops of various screw conveyor structures for shield machines[J]. Transactions of the Japan society of mechanical engineers series c,1996,62(599):2927-2930.

[7] MERRITT A S. Conditioning of clay soils for tunnelling machine screw conveyors[D]. Cambridge:University of Cambridge,2005.

[8] 肖超,谭立新,陈仁朋,等. 考虑渣土特征的盾构施工力学动态耦合仿真研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(6):1108-1115.

XIAO Chao,TAN Lixin,CHEN Renpeng,et al. Dynamic coupling simulation of shield construction mechanics considering characteristics of soils[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2019,41(6):1108-1115(in Chinese).

[9] 江玉生,王春河,陈冬,等. 土压平衡盾构螺旋输送机力学模型简析[J]. 力学与实践,2007,29(5):50-53.

JIANG Yusheng,WANG Chunhe,CHEN Dong,et al. A mechanical model of earth pressure balance shield screw conveyor[J]. Mechanics in engineering,2007,29(5):50-53(in Chinese).

[10] 董金玉,王闯,周建军,等. 泡沫改良砂卵石土的试验研究[J]. 岩土力学,2018,39(增刊1):140-148.

DONG Jinyu,WANG Chuang,ZHOU Jianjun,et al. Experimental study of foam-improved sandy gravel soil[J]. Rock and soil mechanics,2018,39(S1):140-148(in Chinese).

[11] 雷国辉,高翔,徐可,等. 饱和软黏土固结过程中的不排水抗剪强度特性[J]. 岩土工程学报,2019,41(1):41-49.

LEI Guohui,GAO Xiang,XU Ke,et al. Behavior of undrained shear strength of saturated soft clay under consolidation[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2019,41(1):41-49(in Chinese).

[12] LI X C,YANG Y,JIN D L,et al. Theoretical analysis and experiment of pressure distribution and pressure gradient of shield screw conveyor:Taking sandy soil as an example[J]. Scientific reports,2020,10(1):7831.

[13] 宁廷州,李偎,缑亚楠. 基于 EDEM 的倾斜螺旋输送机输送能力研究[J]. 牡丹江师范学院学报(自然科学版),2019(4):38-41.

NING Tingzhou,LI Wei,GOU Yanan. Research on conveying capacity of inclined screw conveyor based on EDEM[J]. Journal of Mudanjiang Normal University (natural sciences edition), 2019 (4):38-41(in Chinese).

[14] 李兴春. 改性砂砾土盾构螺旋输送力学特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.

[15] 王洪新,傅德明. 土压平衡盾构平衡控制理论及试验研究[J]. 土木工程学报,2007,40(5):61-68.

WANG Hongxin,FU Deming. Theoretical and test studies on balance control of EPB shields[J]. China civil engineering journal,2007,40(5):61-68(in Chinese).

[16] 王俊,何川,王闯,等. 砂土地层土压盾构隧道施工掌子面稳定性研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(1):177-185.

WANG Jun,HE Chuan,WANG Chuang,et al. Face stability analysis of EPB shield tunnel in sand[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2018,40(1):177-185(in Chinese).

[17] 王树英,刘朋飞,胡钦鑫,等. 盾构隧道渣土改良理论与技术研究综述[J]. 中国公路学报,2020,33(5):8-34.

WANG Shuying,LIU Pengfei,HU Qinxin,et al. State-of-the-art on theories and technologies of soil conditioning for shield tunneling [J]. China journal of highway and transport,2020,33(5):8-34(in Chinese).

(编辑　史淑英)